

# 农产品智慧供应链：内涵、关键技术与未来方向

韩佳伟<sup>1,2,3</sup>, 杨信廷<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 北京市农林科学院信息技术研究中心, 北京 100097, 中国; 2. 农产品质量安全追溯技术及应用国家工程研究中心, 北京 100097, 中国; 3. 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 北京 100097, 中国)

**摘要:** [目的/意义] 农产品供应链智能化转型是破解传统环节信息断层、高物流成本与质量追溯难题的关键路径, 对提升效率、保障质量安全及农业现代化意义重大。本文系统解析其内涵, 梳理各环节技术进展并提出发展方向。[进展] 详细梳理了农产品智慧供应链在生产、加工、仓储、运输、配送、销售等各环节的关键技术研究进展。生产环节集成物联网、人工智能(Artificial Intelligence, AI)与区块链技术, 实现精准决策与病虫害防控; 加工环节依托智能分拣、新型清洗减菌技术提升品质; 仓储通过物联网监测与AI优化库存管理提高效率; 运输聚焦冷链技术创新与智能调度系统优化配送时效; 销售端运用大数据与AI技术驱动精准营销与库存管理, 全链可溯源确保数据透明。[结论/展望] 未来需加速无人化运作与信息共享平台建设, 通过技术赋能提升供应链韧性, 并推进精细化管理以增强国际竞争力; 产业模式上应深化低碳转型, 推广清洁能源、绿色包装及智能物流, 对接“双碳”目标。当前技术应用仍面临数据治理、标准化不足等挑战, 需政策引导建立技术规范、加大研发投入, 并强化跨领域协同创新, 推动智能化升级, 为农业可持续发展和全球粮食安全提供支撑。

**关键词:** 农产品; 智慧供应链; 物联网; 人工智能; 区块链; 双碳

中图分类号: F326.6

文献标志码: A

文章编号: SA202501006

引用格式: 韩佳伟, 杨信廷. 农产品智慧供应链: 内涵、关键技术与未来方向[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(3): 1-16.

DOI: 10.12133/j.smartag.SA202501006

HAN Jiawei, YANG Xinting. Smart Supply Chains for Agricultural Products: Key Technologies, Research Progress and Future Direction[J]. Smart Agriculture, 2025, 7(3): 1-16. DOI: 10.12133/j.smartag.SA202501006 (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

农产品作为人类生存和发展的基础物资, 其供应链的稳定性和高效性直接关系到食品安全、农业可持续发展, 以及农民的切身利益。传统的农产品供应链涵盖生产、加工、仓储、运输、销售等多个环节, 由于环节多、场景复杂、时效性强, 存在信息不对称、物流成本高、农产品质量追溯难等诸多问题<sup>[1,2]</sup>。随着新一代信息技术的飞速发展及其在各个领域的广泛应用, 农产品供应链的智能化转型已成为社会发展的必然趋势, 不仅有助于提升供应链效率、保障农产品质量安全, 还能满足市场对高品质农产品的需求, 进一步促进农民增收增收, 推

动农业现代化进程, 增强中国农产品的国际竞争力<sup>[3]</sup>。

目前, 国内外学者围绕农产品供应链的智能化转型已开展了部分研究。Mane等<sup>[4]</sup>对区块链技术及其在农业供应链管理中的应用进行了探讨, 分析了如何通过结合Java智能合约和物联网集成来提高农业供应链的透明度、效率和安全性。周云和尹露<sup>[1]</sup>从现代物流体系支持的角度, 分析了农产品供应链智能化发展的可行性及挑战。此外, 邓汝春等<sup>[3]</sup>则从关键技术角度出发, 研究了农产品供应链数字化平台的关键技术及其应用, 强调了大数据、物联网等技术的重要性。然而, 尽管这些研究

收稿日期: 2025-04-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2001302, 2022YFD2001804); 宁夏回族自治区重点研发计划(2024BEG02031); 北京市农林科学院科研创新平台建设项目(PT2025-24)

作者简介: 韩佳伟, 博士, 副研究员, 研究方向为智慧低碳冷链物流关键技术。E-mail: hanjw@nercita.org.cn

\*通信作者: 杨信廷, 博士, 研究员, 研究方向为智慧低碳供应链关键技术。E-mail: yangxt@nercita.org.cn

copyright©2025 by the authors

(登录 www.smartag.net.cn 免费获取电子版全文)

从不同侧面探讨了农产品供应链的智能化转型,但仍存在一些不足之处。首先,综合性研究成果相对较少,多数研究聚焦于某一具体技术或环节,缺乏对整个智能化转型过程的系统梳理和全面分析。其次,对于新兴技术在农产品供应链中的实际应用案例和效果评估不够深入,未深入挖掘区块链、人工智能(Artificial Intelligence, AI)等新兴技术在供应链中的具体应用场景与实践效果。此外,未能系统梳理农产品供应链各环节(如生产、加工、流通、消费)的关键技术适配性及综合应用路径。

鉴于此,本文针对农产品智慧供应链,一是在内涵界定上,综合研究进展与实践,明确提出农产品智慧供应链的新内涵,为后续研究提供清晰概念框架;二是在研究内容方面,全面且系统地梳理农产品供应链各环节关键技术进展,涵盖生产到销售全流程,并深入分析多项新兴技术发展趋势,填补相关领域综合研究的空白;三是紧密结合时代背景与行业需求,从运作流程、管理体系、产业模式等维度对农产品供应链未来发展进行前瞻性展望,为行业发展提供创新思路与方向。本文以期对农产品供应链的智能化转型提供理论支撑和实践指导,推动农业供应链的现代化与可持续发展。

## 1 农产品智慧供应链的内涵

1982年,新制度经济学代表人物奥利弗·威廉姆森(Oliver Williamson)在其经典著作《市场与等级制:分析与反托拉斯含义》(*Markets and Hierarchies: Analysis and Antitrust Implications*)中首次系统提出“供应链”(Supply Chain)一词。这一概念的初始界定聚焦于企业间交易关系的组织形态分析,虽未形成明确的操作性定义,但为供应链管理理论体系的建构奠定了重要理论基础。经过十余年发展,国际供应链协会(Supply Chain Council, SCC)于1996年推出具有里程碑意义的供应链运作参考模型(Supply Chain Operations Reference, SCOR),首次将供应链明确定义为“围绕核心企业,通过信息流、物流和资金流的集成控制,实现从原材料采购到终端用户交付的网链结构体系”,并通过计划、采购、生产、交付和逆向物流五大核心流程构建标准化管理框架。这种系统化的理论突破不仅推动供应链管理从概念层面向实践领域转化,更使其成为企业战略管理的关键组成部分。这一理论演进在中国得到进一步规范化发展。2011年,原国家质量监督检验检疫总局与中国国家标准

化管理委员会联合发布的GB/T 26337.2-2011《供应链管理 第2部分:SCM术语》,从产业网络视角将供应链界定为“生产及流通过程中,围绕核心企业,将所涉及的原材料供应商、制造商、分销商、零售商直到最终用户等成员通过上游或下游链接所形成的网络结构”。值得注意的是,随着21世纪大数据、物联网、AI等新一代信息技术的突破性发展,供应链的概念产生质的跃迁,从传统线性业务流程演变为数据驱动的智能生态系统。在此背景下,复旦大学罗钢博士于2009年前瞻性地提出“智慧供应链”概念,强调其本质是通过物联网技术与现代管理理论的深度融合,构建具备智能化、网络化和自动化特征的技术与管理综合集成系统。

在农产品领域,农产品供应链特指以初级农产品为核心载体,由生产、加工、仓储、运输、配送及销售等环节构成的多主体链网体系,如图1所示。结合全球供应链智能化转型实践,可将农产品智慧供应链定义为:依托物联网、大数据、区块链、AI等现代信息技术及智能装备,通过全流程数据采集、智能决策和动态优化,实现精准生产加工、高效物流配送、智能营销服务和可信质量溯源的供应链创新形态。农产品智慧供应链的核心特征体现在:通过智能传感网络实现的全环节实时监控,基于数据挖掘的决策优化机制,区块链赋能的透明化溯源体系,以及多主体协同的生态化运作模式。

从图1可以看出,实现农产品智慧供应链的关键技术包括物联网、大数据、区块链、AI、遥感、机器人、新能源和新材料等。物联网实时采集农产品生产、运输等环节数据,大数据分析优化供应链决策,区块链确保数据真实溯源,AI预测需求与智能调度,遥感监测产地环境,机器人助力仓储物流自动化,新能源和新材料提升运输储存效率与环保性,协同构建高效、透明、智能的农产品智慧供应链。

## 2 农产品智慧供应链各环节的关键技术

农产品智慧供应链涵盖了从生产到销售的多个环节,每个环节都依赖于先进的关键技术来确保其高效、智能和可持续运作。以下将详细探讨生产、加工、仓储、运输、配送及销售等环节中应用的关键技术,并分析这些技术如何提升农产品供应链的整体效能。

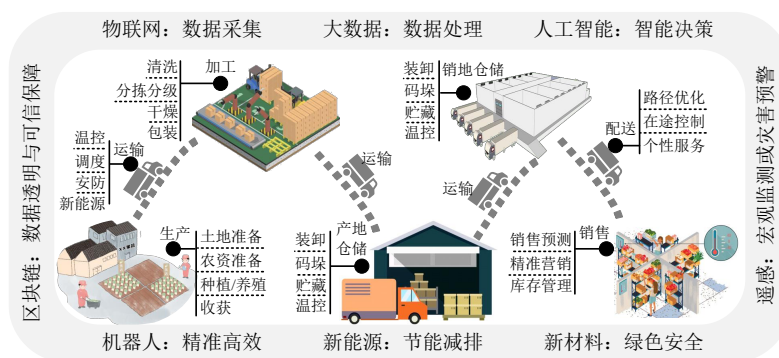


图1 农产品智慧供应链及关键技术示意图

Fig.1 Schematic diagram of the smart supply chain for agricultural products and key technologies

## 2.1 生产环节关键技术

农产品供应链中的生产环节作为智慧供应链的起点，涉及土地与农资准备、种植或养殖过程管理、田间或养殖环境管控、收获等多个方面。当前，物联网、大数据、AI、区块链及遥感等技术在此环节中展现出巨大应用潜力，学者利用物联网、大数据等技术，对农作物的生长环节进行实时监测，优化农业生产决策，协同联动解决智慧供应链中的实际痛点问题，主要有以下内容。

一是物联网技术的实时监测与数据采集。物联网技术通过部署在农田中的各类传感器，实现对土壤湿度、温度、光照强度、病虫害状况等环境参数的实时监测与数据采集，为后续的农业生产决策提供了科学依据。例如，Cao等<sup>[5]</sup>基于物联网的棉花病虫害实时监测预警系统，能够实现准确率达95%地监测并预警病虫害情况，有效提升了病虫害的防治效率。

二是大数据处理与分析挖掘技术。大数据技术通过整合物联网采集的海量数据，运用数据分析与挖掘技术，为农业生产提供全面的风险监测和资源优化方案，辅助进行精准农业决策。例如，Wu等<sup>[6]</sup>利用多源传感器网络采集的光照、温度和土壤水分数据，结合大数据分析模型，可优化农作物灌溉和施肥策略，实现资源的高效利用；Tan和Nihan<sup>[7]</sup>基于多个农场作物成熟时间、收获时间、产量，以及市场需求的不确定性，提出一种农场作物种植面积与播种时间的规划方法，相比不考虑农场供应和市场需求的不确定性，可使预期利润约提升16%。

三是AI辅助智能决策技术。通过整合高通量表型分析、遥感技术和无线传感器网络，AI能够实时分析农作物生长数据，优化施肥、灌溉和病虫害

管理策略<sup>[8]</sup>。此外，基于AI的智能农药喷洒系统可根据作物需求动态调整喷洒路径和剂量，减少农药浪费和环境污染<sup>[9]</sup>。

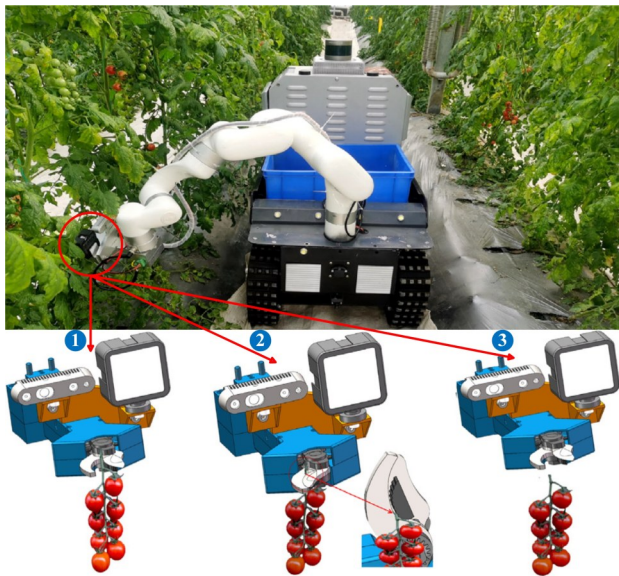
四是遥感技术的宏观监测与灾害预警。遥感技术通过卫星或无人机等遥感平台，获取农田的宏观信息，如作物长势、土壤湿度、植被覆盖度等，为农业生产提供宏观监测与灾害预警服务。例如，Vreugdenhil等<sup>[10]</sup>利用遥感数据结合地面实测的后向散射信号和植被指数，能够有效监测油菜、玉米及冬季谷物的生长状况。此外，遥感技术还能结合降雨估算和生物物理指标，自动识别农业生产异常热点，为全球粮食安全危机的早期预警提供支持<sup>[11]</sup>。

五是区块链技术的数据透明与信任保障。区块链技术通过其去中心化、不可篡改的特性，为农产品生产环节的数据记录与共享提供了透明化与信任保障。例如，Vangipuram等<sup>[12]</sup>通过传感器实时采集生产数据，如农作物的种植过程、使用农药和肥料的情况等，并结合区块链技术，可以确保生产数据的精确记录和共享，增强消费者对农产品的信任度。此外，区块链技术还促进了农业数据的跨区域共享，为农业生产管理和市场监管提供了有力支持<sup>[13]</sup>。

此外，在生产环节，机器人技术被应用于精准播种和智能采摘<sup>[14]</sup>。例如，一些先进的农业机器人能够根据土壤条件和作物需求，实现精准播种，提高种子的发芽率和作物的生长质量<sup>[15]</sup>。同时，智能采摘机器人能够自动识别成熟果实（见图2），进行高效、无损的采摘作业，减少人力成本并提高采摘效率<sup>[16]</sup>。

尽管物联网、大数据、AI、遥感及区块链等技术在农产品生产环节中展现了巨大潜力，但仍面临





注:1.剪刀校准阶段;2.剪刀闭合阶段;3.剪刀松开阶段。

图2 温室内小番茄采摘机器人<sup>[14]</sup>

Fig. 2 A small tomato-picking robot working in a greenhouse

一些通用挑战。首先,农业生产环境复杂多变,对传感器的稳定性和可靠性提出了高要求。其次,数据整合与分析存在难度,不同来源的数据格式和标准不统一,增加了处理难度。最后,技术应用的广泛性和普及性仍需提高,特别是在中小规模农户中的应用存在障碍。针对上述挑战,建议加强农业传感器的研发,提高其适应性和耐用性;推动农业大数据标准的建立,促进数据共享与互操作;同时,加强技术培训和推广,降低技术应用门槛,鼓励更多农户采用智能化生产技术,以提升整个农产品生产环节的智能化水平和管理效率。

## 2.2 加工环节关键技术

紧接生产环节,农产品加工环节是智慧供应链中不可或缺的一环,旨在对农产品进行适度的物理、化学或生物处理,如清洗、分拣、分级、干燥、包装等,以延长其保质期、优化外观并便于后续储存、运输和销售。该环节不仅是对生产环节成果的进一步处理与增值,也是确保农产品最终品质的关键步骤。在加工环节,同样离不开信息化技术支撑。物联网技术通过实时监测加工过程中的温度、压力、时间等工艺参数,帮助实现生产线的自动化和智能化,降低人工成本,提高生产效率。通过大数据和AI技术分析加工设备的运行数据和生产流程数据,帮助优化生产流程,提升效率,确保加工产品的质量符合标准,整体提高企业盈利能力等。

在加工过程中,农产品的清洗是去除表面泥土、杂质、农药残留及减少微生物安全隐患的首要步骤。传统清洗方式存在清洗不彻底、易造成二次污染等问题,因此新型清洗减菌技术成为研究热点。例如,超声波清洗技术通过高频振动产生的空化效应,有效破坏微生物细胞壁,实现对农产品的深度清洁<sup>[17]</sup>。此外,微纳米气泡、电解水、等离子体活化水及精油清洗等新型技术也展现出良好的减菌效果,为农产品加工提供了更多安全、高效的清洗选择。

分拣与分级是农产品加工中的重要环节,旨在根据农产品的质量、规格等特性进行精确分类。计算机视觉<sup>[18]</sup>、高光谱成像<sup>[19]</sup>、近红外光谱<sup>[20]</sup>、深度学习、机器人等技术被用于实现农产品的智能分级分选、缺陷检测、营养物质评估及包装,通过集成视觉识别系统和机械臂,实现智能分拣与分级系统,显著提高了加工环节的工作效率和产品质量<sup>[21,22]</sup>。例如,Saedi等<sup>[23]</sup>基于卷积神经网络的自动分拣系统能够准确识别农产品的大小、形状、颜色等特征,实现高效、精准的分拣。Wei等<sup>[24]</sup>提出了一种基于光谱技术和计算机视觉的高光谱成像方法用来检测水产品的鲜度及质量,为保证新鲜水产品的质量、减少损失提供了技术支持。这些技术的应用不仅提高了分拣与分级的效率和准确性,还减少了人力成本,为农产品加工环节的自动化、智能化提供了有力支撑。

干燥是农产品加工中常用的保鲜手段,通过降低农产品水分含量,延长其货架期。太阳能干燥、热泵干燥等新型干燥技术以其高效、环保的特点受到广泛关注<sup>[25]</sup>。同时,包装技术作为农产品加工的最后道工序,对于保护农产品质量、延长保质期具有重要意义。智能包装、活性包装及绿色包装等新型包装技术的应用<sup>[26,27]</sup>,不仅提升了农产品的保鲜效果,还符合现代消费者对环保、健康的需求。

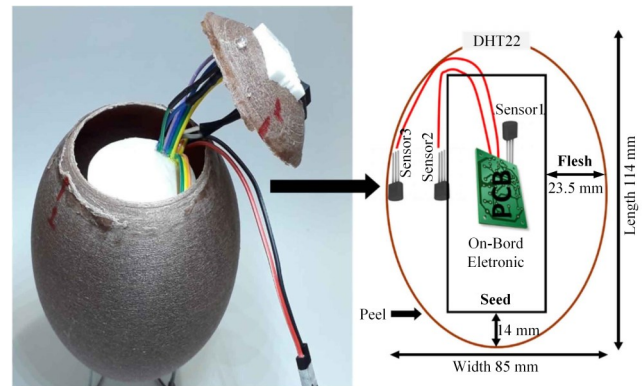
尽管新型清洗减菌、智能分拣与分级、高效干燥与包装等技术在农产品加工环节中展现出巨大潜力,但仍面临诸多挑战。例如,新型清洗技术的成本较高,智能分拣与分级系统的识别精度和适应性有待提升,高效干燥技术的能耗和效率需进一步优化等。未来研究应重点关注降低技术成本、提高系统适应性和效率等方面,同时加强跨学科技术融合,推动农产品加工环节的全面智能化升级。

## 2.3 仓储环节关键技术

仓储环节作为农产品供应链的中间桥梁，与加工环节紧密相连，起到承上启下的关键作用，负责加工后产品的妥善存储与保管，确保其品质与安全，为后续运输与销售奠定基础。两者在供应链中相互依赖，共同确保农产品的有效流通与增值。

在仓储环节关键技术的研究中，学者们基于新一代信息技术，聚焦于提升存储效率、优化库存管理以及增强环境控制等方面，提高农产品智慧供应链透明度<sup>[28, 29]</sup>。借助物联网技术，可以实时监测仓库内的温湿度、气体浓度等参数，以及农产品的新鲜度、农药残留等指标，保障产品质量安全<sup>[30, 31]</sup>。如，De Mello等<sup>[32]</sup>提出的基于热物性仿生的人造芒果监测系统为精准感知果品温度提供了可能（见图3）。Fan等<sup>[33]</sup>通过无损检测技术构建了鱼肉新鲜度预测模型。通过分析历史销售数据、市场趋势和季节性因素，可以预测农产品的需求量，优化库存水平。AI技术通过空间映射遗传算法等，能够优化仓储的垛位分配，减少仓储成本与时间<sup>[34]</sup>。De Santis等<sup>[35]</sup>利用机器学习，提出了一种监督学习模型来解决库存控制中的缺货预测问题，为有效降低企业的缺货风险、提升库存管理系统的服务水平提供了有力保障。Tang等<sup>[36]</sup>利用群体智能建立了一种基于两层遗传算法的自动导向车（Automated Guided Vehicle, AGV）无人仓库数学模型，有效解决了复杂的联合优化问题，为增强仓储环节的运作效能、加速货物的流转速度和减少订单处理时间提供了有效助力。Pal<sup>[37]</sup>基于深度学习构建了一种将神经网络与预测方法相结合的混合AI模型，为提升准时制库存管理的准确性、提升库存效率，以及实现绿色供应链和循环经济模式提供了有力保障。机器人技术也在仓储环节发挥巨大作用，搬运机器人和码垛机器人可实现自动化检索、搬运、存储和码垛等任务，显著提高搬运速度与拣货精度，降低人力成本，同时通过合理规划搬运路径和存储位置，显著提高空间利用率。例如，上海苏宁1 000 m<sup>2</sup>的仓库里，采用了200台仓库机器人用于商品拣选，1 000件商品的拣选可减少50%~70%人工，且小件商品拣选效率比人工高3倍以上，同时准确性精度可达99.99%。Zhu等<sup>[38]</sup>提出了一种处理异构化箱体的机器人码垛系统，显著提高了仓储作业的自动化水平与效率。

然而，仓储环节研究目前仍存在诸多问题与发展瓶颈。首先，仓储环境控制的精准度与稳定性有



注：Sensor 1 为种子温度传感器和电子电路；Sensor 2 为果肉温度传感器；Sensor 3 为果皮温度传感器；DHT22 为环境温度与相对湿度传感器。

图3 人造芒果及其电子元件示意图<sup>[32]</sup>

Fig. 3 Artificial mango and on-board electronic components

待提升。农产品在仓储过程中易受温湿度波动影响，导致品质下降，如何实现大规模、低成本的仓储环境精准调控仍是一大挑战。其次，库存管理的智能化与精细化程度不足。农产品仓储往往面临种类繁多、数量庞大、保质期短等问题，传统库存管理方式难以满足高效、精准的需求，如何在复杂多变的仓储环境中实现全品类农产品的智能库存管理与动态优化，仍需进一步研究。

综上所述，仓储环节作为农产品供应链的重要组成部分，其关键技术的研究与发展对于提升供应链整体效率与效益具有重要意义。本文提出以下解决方案与未来优化方向：一是加强仓储环境智能调控技术研究。利用物联网、大数据与AI等技术，构建智能仓储环境调控系统，实现对仓储环境的实时监测与精准调控。通过算法优化与模型训练，提高环境控制的精准度与稳定性，降低农产品在仓储过程中的品质损耗。二是推进库存管理智能化与精细化发展。结合射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）<sup>[39]</sup>、条形码扫描<sup>[40]</sup>与计算机视觉<sup>[41]</sup>等技术，实现农产品库存信息的快速采集与精准识别。运用大数据分析 with AI 算法，构建智能库存管理系统，实现库存的动态优化与精准预测，降低库存成本，提高供应链响应速度。三是促进仓储作业自动化与无人化发展。加大智能仓储设备的研发与应用力度，研制自动化码垛机器人等，减少人工干预，提高仓储作业效率与准确性。同时，加强仓储作业流程的标准化与规范化建设，为自动化与无人化仓储作业提供有力支撑。未来应继续推动仓储环节向智能化、精细化与无人化方向迈进。



## 2.4 运输环节关键技术

运输环节作为农产品供应链中的关键环节,与仓储环节紧密相连,共同确保农产品从生产到消费的顺畅流通。仓储环节为运输环节提供了必要的农产品储备与中转,而运输环节则负责将农产品从仓库高效、安全地送达消费市场,两者在供应链中相互依存,共同保障农产品的时效性与品质。在运输环节关键技术的研究中,学者们聚焦于冷链运输的温度控制<sup>[42]</sup>、在途农产品的安全防护<sup>[43]</sup>、智能运输调度系统的优化<sup>[44]</sup>,以及新能源车辆的应用<sup>[45]</sup>等方面的研究。如通过分析交通状况、运输成本、运输时间等数据,优化运输路线,减少运输时间和成本;通过大数据平台实现供应链各环节的信息共享,提高供应链的协同效率,减少信息不对称带来的风险;运输机器人能够根据货物特性和运输需求,进行智能调度和优化路径规划,确保农产品在运输过程中的新鲜度和安全性<sup>[46]</sup>。然而,尽管取得了一定进展,运输环节仍存在诸多问题与发展瓶颈。首先,冷链运输的温度控制精度与稳定性仍需提升。农产品在运输过程中易受温度波动影响,导致品质下降。尽管现有研究如某些文献中提到的精准温度监控系统为冷链运输提供了技术支持,但如何在大规模、长距离的运输过程中保持稳定的冷链环境,仍是一大挑战<sup>[47]</sup>。其次,智能运输调度系统的整合与优化面临困境。不同运输企业、仓储设施,以及农产品供应商之间的信息系统相互独立,数据格式与接口标准不统一,导致信息流通受阻,难以实现运输资源的优化配置<sup>[48]</sup>。此外,农产品运输需求波动大且复杂多变,现有的智能调度算法难以兼顾多维度需求,影响运输效率与效益。

运输环节关键技术的研究与发展对于提升农产品智慧供应链整体效率与效益具有重要意义。拟提出以下解决方案与未来优化方向。一是加强冷链运输技术研发与应用。研发更加精准、稳定的冷链运输技术,如智能温控系统、相变材料<sup>[49]</sup>等,提高农产品在运输过程中的温度控制精度与稳定性。同时,加强冷链运输设备的维护与保养,确保其长期稳定运行。二是推进智能运输调度系统的整合与优化。建立统一的信息平台与数据标准,促进不同运输企业、仓储设施,以及农产品供应商之间的信息共享与协同作业。运用大数据分析与AI算法,优化运输调度策略,实现运输资源的合理配置与高效利用。三是探索新能源车辆在农产品运输中的应用。积极推广太阳能、氢能等新能源车辆在农产品

运输中的使用,降低运输环节的碳排放与运营成本。同时,加强新能源车辆与现有运输体系的兼容性研究,推动新能源车辆在农产品运输中的广泛应用。未来应继续推动运输环节向智能化、绿色化方向迈进。

## 2.5 配送环节关键技术

配送环节作为农产品供应链的“最后一公里”,与仓储环节和运输环节紧密衔接,共同确保农产品从产地到消费市场的无缝对接。仓储环节为配送提供了稳定的货源支持,而运输环节则负责将农产品从仓库运送到配送中心,进而由配送环节完成最终的送货上门服务。三者相互依存,共同构成了农产品供应链的高效运作体系。农产品智慧供应链配送环节主要开展的工作包括路径优化、在途控制,以及个性服务等,并取得了系列进展。如Zheng等<sup>[50]</sup>基于群体智能技术,提出了一种基于混合遗传算法的冷链配送中心选址和路径规划方法,为有效降低配送成本提供了技术支撑。Saif-Eddine等<sup>[51]</sup>提出了一种基于改进遗传算法优化车辆路径规划与配送频率决策的方法,为有效降低总成本、提高运营效率,以及未来多梯队供应链等相关研究奠定了基础。Hu等<sup>[52]</sup>提出了一种基于大数据分析技术和Dijkstra算法的物流车辆最优路径识别系统,该系统可以对交通拥堵状况和天气状况达到88%的预测准确率,实现了物流车辆最优路线的精准规划。Jiang等<sup>[53]</sup>针对水果配送提出了一个综合考虑新鲜水果成熟度的配送路径优化模型,有效减少了因过早或过晚采摘导致的水果品质下降。Zheng<sup>[54]</sup>基于深度学习技术,提出了一种基于神经网络模型的冷链配送绩效评估方法,为防止农产品交叉污染、保障农产品质量及提升冷链物流运营效率提供了科学决策。Becker等<sup>[55]</sup>基于机器学习,提出了一种基于神经网络模型的路径优化方法,相比其他五种启发式算法,模型性能提高了48%,有效提高了产品配送效率。Liu等<sup>[56]</sup>提出了一种基于模拟退火算法求解联合配送车辆路径问题模型的方法,相比单一配送,联合配送能有效降低总成本和碳排放,为推动冷链物流行业的可持续发展提供了决策依据。姚佼等<sup>[57]</sup>提出了一种基于优化K-means算法的物流配送中心选址方法,相比传统方法,物流总成本降低了8.76%,为有效降低物流成本并为物流配送中心选址提供更有效的方法和依据提供了科学指引。Chen等<sup>[58]</sup>构建了一种基于时空聚类算法和非支配

排序遗传算法 II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II) 智能算法的前置仓选址模型, 与传统选址模型相比, 可降低总成本达 38.84%, 提高客户时间满意度达 36.22%。

在深入分析配送环节关键技术的文献后, 可以发现尽管该领域取得了一定进展, 但仍面临一些问题和瓶颈。配送网络布局不合理问题依然突出, 导致配送资源浪费严重, 物流成本居高不下。农产品在途损耗大、配送过程中的温度控制、震动防护等问题尚未得到有效解决, 影响了农产品的品质与安全。同时, 个性化配送服务需求日益增长, 但现有的配送模式难以满足市场的多样化需求。

针对上述问题, 拟提出以下解决方案与未来优化方向。一是优化配送网络布局。利用大数据分析 with 智能算法, 对配送网络进行科学规划与优化, 减少配送距离与时间, 降低物流成本<sup>[59]</sup>。同时, 加强配送中心与仓储、运输环节的协同作业, 提高整体运作效率。二是强化在途质量控制。研发先进的温控技术与震动防护装置, 如基于物联网多源数据采集与人工神经网络的超温报警系统, 确保农产品在配送过程中的品质与安全<sup>[60]</sup>。同时, 加强配送车辆的维护与保养, 减少故障率, 提高配送效率。三是推动个性化配送服务。利用大数据与 AI 技术, 如基于聚类分析的精准营销策略, 对消费者需求进行精准分析, 根据消费者的时间偏好、收货地址等信息, 智能规划配送路线与时间, 提供个性化配送服务<sup>[61]</sup>, 提升客户满意度。未来, 随着物联网、大数据、AI 等技术的不断发展, 配送环节将向更加智能化、高效化、个性化的方向迈进。通过不断优化配送网络、强化在途质量控制与推动个性化服务, 将进一步提升农产品供应链的整体运作效率与竞争力。

## 2.6 销售环节关键技术

销售环节与配送环节紧密相连, 共同构成了农产品从产地到消费者手中的最后一道桥梁。配送环节的高效运作确保了农产品能够及时、准确地送达销售终端, 为销售环节提供了坚实的支撑, 而销售环节则通过精准营销、智能销售平台等手段, 将农产品有效转化为市场价值, 实现了供应链的闭环管理。两者之间的紧密衔接与高效协同, 对于提升农产品供应链的整体运作效率至关重要。农产品智慧供应链在销售环节主要进行销售预测、精准营销, 以及库存智能管理等工作, 其关键技术的研究与应

用对于提升整个供应链的运作效率与竞争力具有重要意义。

在销售环节, 大数据分析和人工智能技术被用于市场分析, 实现需求预测、价格优化和精准营销。如通过分析历史销售数据、市场趋势、消费者行为等预测市场需求, 帮助企业制定更有效的销售策略。Mohamed-Amine 等<sup>[62]</sup>以历史销售记录、气象数据、市场价格波动、节假日信息, 以及相关经济指标等多维度数据为输入, 构建了基于机器学习的农产品销售量预测模型, 为精准预判农产品销售动态提供决策支持。庄家煜等<sup>[63]</sup>以自 1980 年以来大量农业数据作为样本, 充分考虑农产品品种、时间、收入、经济发展等因素影响, 构建了基于深度学习长短时记忆神经网络的农产品供需预测模型, 实现对 9 种主要农产品供需分析预测。Dellino 等<sup>[64]</sup>提出了一种基于遗传算法的决策支持系统用于生鲜食品供应链, 依据产品新鲜度、库存等关键绩效指标确定最优订单提案, 有效提高了供应链管理决策的科学性和效率。Feizabadi<sup>[65]</sup>基于机器学习构建了一种基于时间序列模型和机器学习技术相结合的混合需求预测模型, 使需求预测准确性平均提高了 5%, 减少了存储成本以及运营费用。通过分析市场价格波动数据、竞争对手价格数据等, 制定最优的定价策略, 提高市场竞争力。通过分析消费者购买行为、偏好、地理位置等数据, 构建消费者画像, 实现精准营销, 提高客户满意度和忠诚度, 如 Hu 等<sup>[66]</sup>提出的基于聚类分析的精准营销策略, 能够有效定位目标客户群体, 分析不同销售渠道的销售数据, 优化销售渠道布局, 提高销售效率。而机器人技术则被应用于智能导购和自动结算。智能导购机器人能够根据顾客的需求和偏好, 提供个性化的购物建议和导航服务。自动结算机器人能够快速、准确地完成商品扫描和结算工作, 提升顾客的购物体验<sup>[67, 68]</sup>。

深入分析销售环节关键技术的文献, 可以发现尽管该领域已取得显著进展, 但仍面临一些挑战和发展瓶颈。一方面, 尽管大数据分析与精准营销技术在农产品销售中得到了广泛应用, 但消费者隐私保护、信息质量及专业人才缺乏等问题仍然突出。尤其是如何平衡精准营销与消费者隐私保护之间的关系, 仍是亟待解决的问题<sup>[69]</sup>。另一方面, 智能销售平台与电商模式创新不断涌现, 如社交电商、直播电商等新型销售模式在农产品销售中的应用日益广泛, 但如何降低销售成本、拓宽销售渠道、打



破地域限制仍是亟待解决的问题。此外,基于AI的农产品销售预测与库存管理系统虽已初具规模,但在应对市场不确定性、提高预测准确性方面仍需进一步优化。

针对上述问题,拟提出以下解决方案与未来优化方向,进一步推动农产品销售环节的发展与创新。一是加强数据安全与隐私保护。在利用大数据进行销售分析与精准营销时,应严格遵守相关法律法规,加强数据安全与隐私保护,确保消费者信息不被泄露或滥用。二是提升信息质量与数据治理。建立健全的信息质量管理制度,对采集到的销售数据进行清洗、整合与验证,提高数据的准确性、完整性和时效性,为精准营销提供可靠的数据支持。三是培养专业人才与加强团队合作。加大对农产品供应链领域专业人才的培养力度,组建跨学科、跨领域的专业团队,共同推动销售环节关键技术的研发与应用。四是探索新型销售模式与渠道。积极拥抱电商发展趋势,探索社交电商、直播电商等新型销售模式在农产品销售中的应用,拓宽销售渠道,降低销售成本,提升市场竞争力。五是优化销售预测与库存管理系统。结合AI与大数据技术,构建更加精准、高效的销售预测与库存管理系统,提高应对市场不确定性的能力,减少库存积压或缺货现象的发生。未来,随着信息技术的不断发展与创新模式的不断涌现,销售环节将向更加智能化、精准化、高效化的方向迈进。

## 2.7 可信监管与溯源技术

可信监管与溯源技术贯穿于农产品供应链的各个环节,从生产、加工到仓储、运输及销售,确保每一个环节的数据记录准确无误、信息透明可追溯,这是提高监管效率、提升农产品质量安全、维护市场秩序和增强消费者信任的关键。基于可信监管与溯源技术领域的相关文献分析,目前仍存在以下问题和发展瓶颈。首先,尽管区块链、物联网、大数据等新兴技术为构建可信的农产品供应链信息平台提供了技术支持,但数据隐私保护问题仍然突出。例如,Tian<sup>[70]</sup>利用射频识别和区块链技术构建的追溯系统,虽然实现了数据的可靠性与真实性,但区块链技术本身的数据隐私问题仍需解决。其次,不同环节和系统之间的数据标准不统一,导致信息共享存在障碍,难以实现无缝对接。此外,监管机制不健全、法律法规不完善也是制约可信监管与溯源技术发展的重要因素。

针对上述问题,拟提出以下关于农产品监管与溯源的解决方案与未来优化方向。一是加强数据隐私保护<sup>[71]</sup>。在利用区块链等技术进行数据记录与共享时,应引入先进的加密技术和隐私保护机制,确保数据在传输和存储过程中的安全性。例如,可以采用同态加密等技术,实现数据在加密状态下的计算与处理,保护用户隐私。二是统一数据标准与接口<sup>[72]</sup>。推动农产品供应链各环节之间数据标准的统一与规范化,建立统一的数据接口和协议,实现不同系统之间的无缝对接与信息共享。这有助于提高数据处理的效率和准确性,为可信监管与溯源提供有力支持。三是完善监管机制与法律法规。建立健全的农产品供应链监管机制,明确各监管部门的职责与权限,加强协同执法力度<sup>[73]</sup>。同时,完善相关法律法规体系,为可信监管与溯源技术的发展提供法律保障。四是推动技术创新与应用<sup>[74]</sup>。持续推动区块链、物联网、大数据等技术在农产品供应链可信监管与溯源领域的应用创新。例如,可以探索基于AI的数据分析技术,提高溯源效率和准确性;或者研发更加智能、便捷的溯源终端设备,方便消费者查询和验证农产品信息。

综上所述,可信监管与溯源技术对于保障农产品供应链的安全与透明具有重要意义。未来,随着技术的不断进步和监管机制的日益完善,农产品供应链的可信监管与溯源水平将得到进一步提升。通过加强数据隐私保护、统一数据标准与接口、完善监管机制与法律法规,以及推动技术创新与应用等措施的实施,将有效推动农产品供应链向更加安全、高效、可持续发展的方向发展。

## 3 新兴技术在农产品智慧供应链应用面临的挑战与建议

随着新一代信息技术的深度渗透与迭代演进,AI、机器人、新能源及新材料等技术正加速重构农产品智慧供应链的底层架构。这些技术通过数据驱动、智能决策和绿色革新等机制,在供应链全链路数字化、柔性化与低碳化转型中发挥关键作用。然而,技术赋能过程中暴露出的适配性瓶颈、标准化滞后与协同性不足等共性问题,已严重制约供应链整体效能提升。本研究聚焦AI、机器人、新能源和新材料四大核心技术领域(延伸涵盖物联网、大数据、遥感及区块链等支撑技术),通过系统性解析各技术模块的适配障碍与创新路径,旨在构建技术集成应用的理论框架,为农产品供应链的范式革新



提供理论依据与实践路径。

### 3.1 AI 技术

AI 技术在农产品智慧供应链的发展中具有举足轻重的地位，其群体智能、深度学习、机器学习及大数据分析等核心能力，为供应链提供了前所未有的智能化支持。在农产品供应链领域，国内外相关学者利用 AI 在智能仓储管理、物流配送优化、市场需求预测等方面展开了大量研究，为全方位提升农产品供应链的智能化水平、运作效率、质量管控能力以及整体效益等提供了关键技术支撑。

然而，AI 技术在农产品智慧供应链中的应用仍面临一些挑战与瓶颈。

一是数据治理体系存在结构性缺陷。农产品供应链具有多环节、多主体特征，各节点生成数据的格式异质性与采集标准非统一性，导致数据集存在信效度不足的风险。具体而言，训练数据的准确性缺失、完整性缺陷及系统性偏差等内生性问题，将显著制约 AI 模型的参数优化过程，导致预测置信区间扩大与决策逻辑失准。典型例证如需求预测场景中，若历史销售数据存在录入误差或未涵盖极端事件（如公共卫生危机引致的需求突变），将直接削弱时序预测模型的泛化能力，继而导致库存周转率与生产排程计划偏离最优状态。此外，在数据全生命周期管理中，通信协议脆弱性、服务器攻击面暴露等外生性安全威胁，可能诱发敏感数据泄露、非法篡改等次生风险，致使供应链智能系统出现生产逻辑混乱、物流路径失序、市场均衡机制失效等连锁反应，对农业产业经济安全构成系统性冲击。

二是技术嵌入面临适配性瓶颈。农产品品类间存在显著生物学特性差异，其生长周期、贮藏条件及加工工艺参数呈现高度非标特征，导致现有 AI 模型在跨品类应用时出现泛化能力衰减。尤其值得注意的是，基于深度学习架构的黑箱模型因其算法透明度缺失，导致决策逻辑可解释性不足，严重制约技术采纳主体的信任构建。更为关键的是，供应链物理基础设施（包括农业传感器、冷链仓储系统、物流载具等）普遍存在异构硬件体系，与 AI 算法层存在显著兼容性障碍。基础设施智能化升级所需的高额沉没成本，使得中小型农业经营主体陷入技术采纳困境，形成数字化转型中的“马太效应”。

三是标准化建设滞后制约技术扩散。当前农产品供应链智能化实践缺乏跨层级的标准化框架，尤

其在数据采集规范、模型效能评估体系、设备接口协议等关键技术环节存在标准缺位现象，导致技术模块间互操作性低下，难以实现规模经济效益。与此同时，监管制度供给不足问题突出，在数据权属界定、算法决策问责机制、质量追溯体系等维度尚未形成完备的合规性监管框架，可能导致市场信号失真、消费者福利受损等负外部性效应。

针对上述问题，一是应建立统一的数据采集与处理标准，加强数据清洗与整合工作，提高数据质量与互操作性。同时，引入先进的数据加密与隐私保护技术，确保数据在传输与存储过程中的安全性。二是应加大 AI 技术的研发投入，开发更加灵活、可定制的 AI 模型，以适应不同农产品供应链的特定需求。同时，推动供应链物理基础设施的智能化升级，提高与 AI 算法的兼容性。三是应加快制定农产品供应链智能化相关标准，包括数据采集、处理、分析、应用等各个环节，以推动技术的规范化应用。同时，加强监管机制与法律法规建设，为 AI 技术在农产品供应链中的应用提供有力保障。

### 3.2 机器人技术

机器人技术是一门涉及机械工程、电子工程、计算机科学、控制理论、AI 等多学科交叉的综合技术领域。随着农产品供应链日益追求高效、精准、智能化运作，面对复杂的生产环境、多样的产品处理需求，以及严格的质量与时效要求，机器人技术的应用成为必然趋势，能够有效弥补传统人力作业的不足，提升农产品供应链各环节的整体效益与竞争力。

尽管机器人技术在农产品供应链中的应用取得了显著进展，但仍面临一些问题和瓶颈。首先，机器人的感知与识别精度有待提高，特别是在复杂多变的工作环境中，如光线、粉尘、湿度等因素的干扰会影响机器人的工作效率。其次，机器人的操作灵活性和精准度仍需加强，特别是在精细操作方面，如海鲜处理或肉类切割等，机器人的机械臂难以达到熟练工人的水平。此外，机器人的通信与协同工作能力也需要进一步提升，以确保不同机器人之间，以及机器人与控制系统之间的高效协同工作。

针对上述农产品供应链机器人技术问题，拟提出以下解决方案与未来优化方向：一是提高感知与识别精度<sup>[75]</sup>。通过引入更先进的传感器和图像处

理技术,提高机器人在复杂环境中的感知与识别精度。同时,加强对机器人算法的优化和训练,使其能够更好地适应不同工作环境和任务需求。二是增强操作灵活性与精准度<sup>[68]</sup>。研发更加灵活和精准的机械臂和末端执行器,提高机器人在精细操作方面的能力。同时,加强对机器人运动控制算法的研究和优化,使其能够实现更加平稳和精确的操作。三是提升通信与协同工作能力<sup>[76]</sup>。建立更加稳定和高效的通信网络,确保机器人之间以及机器人与控制系统之间的实时通信和数据交换。同时,研发更加智能的协同工作算法和策略,提高机器人的协同工作能力和整体效率。

### 3.3 新能源技术

随着全球对可持续发展战略的深入贯彻和日益严格的环保要求,传统能源在农产品供应链中的应用面临多重挑战,诸如高运营成本与环境污染等。新能源技术的引入,为农产品供应链的生产、仓储、运输等环节提供了清洁、高效且可持续的能源解决方案,有效降低了运营成本,减少了碳排放,顺应了绿色农业发展的时代趋势,有助于提升农产品的市场竞争力,并增强了供应链的稳定性和韧性。目前,太阳能光伏发电技术已在农产品供应链的多个环节得到广泛应用,如驱动生产环节的照明、通风系统,加工环节的清洗、分拣设备,以及仓储环节的温控设施等<sup>[77]</sup>。Xiao等<sup>[78]</sup>提出一种以太阳能为动力源的无线温度传感器(见图4),相较于传统电池供电方式,其平均能耗与成本分别降低了87.04%和15.3%。此外,氢燃料电池以其零排放或低排放、高能量转换效率和长续航里程的优势,成为农产品长途冷链运输的理想选择,不仅维持了运输过程中的低温环境,还显著减少了尾气排放<sup>[79]</sup>。

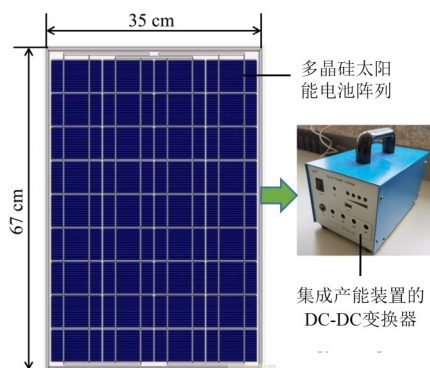


图4 可持续太阳能发电示意图<sup>[78]</sup>

Fig. 4 Implementation diagram of the sustainable solar power

尽管新能源技术在农产品供应链中的应用前景广阔,但仍面临一系列亟待解决的问题,以推动其在该领域的有效落地与持续发展。首要问题在于高昂的初期投资成本,如太阳能光伏发电系统和电动冷链运输车辆的购置费用相对较高,且新能源设备的使用寿命有限,维护与更新成本亦不可忽视。其次,技术稳定性成为制约其广泛应用的关键因素,如太阳能和风能发电易受自然因素影响,难以保证农产品供应链中设施设备的持续稳定运行。同时,新能源技术与现有传统设备和技术体系之间的兼容性问题亦不容忽视,增加了技术应用的复杂性与推广难度。最后,基础设施配套不足也是一大挑战,许多地区的充电设施和加氢站等配套设施尚不完善,严重影响了新能源车辆在农产品运输中的普及与应用。此外,新能源储能技术的局限性也导致能源无法被及时储存与高效利用,进而影响了供应链的整体能源供应效率<sup>[80]</sup>。

针对新能源技术在农产品供应链应用中面临的挑战,建议采取系统性解决方案。首先,通过政府补贴、税收减免等优惠政策降低企业初期投资成本,并建立多元化投资机制吸引社会资本。在此基础上加强新能源技术的研发创新,重点提升太阳能电池板转化效率、开发高稳定性储能系统以增强能源供应的可靠性。同时制定新能源设备与现有供应链设施的兼容性标准,推动跨行业协作完善技术标准体系;此外需加快充电桩、加氢站等基础设施的网格化布局,优先覆盖农产品集散中心与冷链物流枢纽,鼓励企业通过共建共享模式降低建设成本。最后,聚焦储能技术突破方向,着力研发长寿命、高密度电池和智能能源管理系统,实现能源的高效存储与动态调配。通过上述系统性措施,将有效破除技术应用壁垒,推动新能源技术深度融入农产品供应链各环节,加速农业绿色低碳转型进程。

### 3.4 新材料技术

新材料技术在农产品供应链中的应用极为必要,其可显著提升供应链的效率、可持续性和智能化水平。从田间到餐桌,农产品品质易受外界因素干扰,而具有特殊阻隔性能的新材料包装可有效隔绝氧气、水汽等,减少微生物侵袭与营养成分流失,从而确保农产品品质稳定<sup>[81]</sup>。面向供应链绿色发展需求,生物基可降解新材料的应用可显著降低因包装废弃物造成的环境污染。同时,新型保温隔热材料应用于仓储运输环节,也能有效降低能源



消耗<sup>[82]</sup>。在强化供应链精准管控方面,通过将具有传感功能的纳米材料嵌入农产品包装或物流设备中,可实时监测温度、湿度、光照、气体浓度,以及农产品自身的成熟度、新鲜度等关键指标,为供应链各环节的决策提供了精确依据,有助于精准调控仓储环境、优化运输路线与配送时间,进而实现农产品供应链的高效运作与可持续发展,满足现代社会对高品质供给的多元化需求<sup>[83]</sup>。此外,石墨烯作为一种新型材料,其优异的导电性、导热性,以及良好的机械性能等特性,为农产品运输车辆和仓储设备的电力供应提供了更可靠的解决方案<sup>[84]</sup>。石墨烯的应用可有效解决传统电池能量密度低、充电慢等问题,提升设备的运行效率和稳定性。

尽管新材料技术在农产品供应链中的应用前景广阔,但在实际推广与应用过程中仍面临诸多挑战。一是生物基可降解塑料在性能与成本之间存在矛盾,其韧性和阻隔性相比传统塑料较差<sup>[85]</sup>,且生产成本较高,限制了其大规模应用。二是纳米保鲜材料的安全性与其有效性验证难题也亟待解决<sup>[86]</sup>,其对人体健康的长期影响尚不明确,且难以针对每种农产品都达到理想的保鲜效果。例如纳米银抗菌剂可抑制农产品表面的微生物生长,延长保鲜期,但纳米材料可能会迁移到农产品内部并被人体摄入,长期累积对人体健康的影响尚不明确。三是智能包装材料的信息精准度与耐久性问题同样突出,传感器易受复杂环境干扰<sup>[87]</sup>,数据偏差较大,且材料耐久性不足,难以满足长时间运输与储存的监测需求。因此,未来需在新材料技术的研发与应用中,注重解决上述关键问题,以充分发挥其在农产品供应链中的巨大潜力。

针对新材料技术在农产品供应链应用中的关键挑战,建议采取多维度协同推进策略。第一,推动材料性能与成本效益的协同创新,基于多学科协同研发体系,突破生物基可降解塑料的分子构效调控与绿色制备工艺,兼顾力学/阻隔性能提升与规模化降本目标;第二,构建覆盖“制备-应用-废弃”周期的安全评估体系,融合食品毒理学与计算材料学方法,建立纳米保鲜材料的多维度毒理评估模型,并构建基于人工智能算法的保鲜参数数据库,实现材料特性与农产品保鲜需求的动态匹配;第三,开发高鲁棒性智能包装系统,通过微纳传感与抗干扰算法耦合优化提升数据可靠性,创新仿生封装技术与自修复材料集成方案,强化传感器在极端运输环境下的机械稳定性与功能持续性。上述路径

需依托产学研深度协同创新平台,通过构建“研发-标准-应用”联动机制,结合示范工程迭代验证与全链条政策保障体系,驱动新材料技术从基础研究向产业实践的闭环转化,为农产品供应链提质增效提供科学支撑。

### 3.5 其他技术

除以上新兴技术外,目前农产品智慧供应链中常见的新一代信息技术,如物联网技术、大数据技术、遥感技术,以及区块链技术的应用同样面临着多个瓶颈问题。

在物联网技术方面,一是农业生产环境复杂多变,导致传感器测量精度和长期可靠性受影响,难以提供稳定准确的数据;二是农业环境中电力供应不稳定,电池续航时间短,频繁更换电池增加维护成本和工作量;三是网络基础设施不完善,尤其是在广域农田和分散农场,导致数据传输延迟和带宽不足,影响实时监控和大数据应用。为克服这些瓶颈,未来应加大对智能传感器及低功耗网络技术的研发,提升传感器在恶劣环境下的稳定性和耐用性,同时推进农业地区网络基础设施的升级,保障数据传输的稳定性和实时性。

在大数据技术方面,一是不同环节的数据类型多样且格式不一,缺乏统一标准,导致整合和分析困难;二是现有大数据平台处理实时数据时存在延迟,难以满足农业生产的即时决策需求;三是,农业环境的不确定性和多变性使得数据采集困难,预测模型的准确性和可靠性有待提高,尤其是在极端天气和突发事件时。未来应加快农产品智慧供应链大数据标准体系建设,加强对农业大数据的采集和标注工作,推动数据共享与互操作,同时研发更高效的数据处理与分析算法,提升决策的时效性和准确性。

在遥感技术方面,其应用于农产品智慧供应链的主要挑战在于高分辨率数据获取与处理成本高、云层覆盖与气象条件影响,以及数据解释与农艺知识结合不足等问题。未来应加强对低成本、高分辨率遥感技术的研发,提升数据获取的时效性和准确性。同时,加强遥感数据与农艺知识的融合研究,提升遥感监测结果的实际应用价值。

在区块链技术方面,其在农业领域的应用面临与现有设备和系统兼容性差、智能合约应用局限性及监管政策不健全等问题。未来应加强对区块链技术与农业现有系统的集成研究,推动智能合约在农

业动态环境中的应用;同时,完善相关法律法规,为区块链技术在农业领域的应用提供法律保障。

## 4 农产品智慧供应链未来发展方向

尽管目前农产品智慧供应链的研究取得了显著进展,但向智能化转型仍面临诸多实际困难。一是不同环节之间的信息共享存在障碍,导致供应链整体效率受限。二是新兴技术在农产品供应链中的应用仍处于探索阶段,技术成熟度和适用性有待提升。此外,农产品供应链智能化转型所需的资金投入较大,对中小规模农业企业和农户而言,实现智能化转型的难度较大。未来,破解农产品智慧供应链转型困境需以系统思维重构产业生态,围绕“技术-管理-模式”三重维度协同突破。在数字技术深度渗透与传统农业加速变革的叠加效应下,供应链升级不仅需突破单一技术瓶颈,更应通过技术赋能驱动流程再造、管理机制创新与价值网络重构,形成效率提升、韧性增强与可持续发展并重的系统性解决方案。具体而言,应着力推进运作流程的无人化以突破劳动力约束与操作低效,深化管理体系的精益化以破解信息孤岛与资源错配,探索产业模式的低碳化以应对环境规制与绿色消费升级,从而构建技术应用、组织变革与产业转型的良性互促格局。

### 4.1 运作流程的无人化

农产品供应链的无人化是应对劳动力短缺、提升产业效率与标准化的必然选择。随着农村劳动力外流与消费者对品质安全的更高要求,无人化技术可通过精准控制减少人为误差,推动农业生产的规模化与标准化,为产业智能化升级奠定基础。未来愿景中,无人化将覆盖种植、加工、仓储、运输全链条,依托高精度传感、智能算法与自动化设备,实现全流程数据驱动与资源优化,显著提升供应链效率并降低运营成本。然而,无人化落地面临多重现实挑战。在技术层面,复杂农业环境(如多变天气、地形干扰)对系统稳定性提出极高要求,农产品的非标准化特性则加大了无人设备的识别与操作难度,多环节系统集成与数据协同亦需突破技术瓶颈。在成本层面,设备研发、维护的高昂投入与农产品供应链的回报周期长形成矛盾,中小型农业主体普遍面临资金压力。在管理层面,传统作业模式向无人化转型需重构组织架构与决策流程,同时面临技术人才短缺、系统故障风险及数据安全等新问题。因此,推进无人化需以技术创新提升环境适应

性与操作精度,通过政策支持与产业链协作降低规模化成本,并同步优化管理体系与人才培养机制,方能在需求与挑战间实现平衡,推动农业供应链向高效、智能、可持续方向迭代。

### 4.2 管理体系的精益化

农产品供应链管理体系的精益化是提升资源利用效率、保障产品质量与增强市场竞争力的必然选择。随着农业生产规模扩大与市场需求多样化,现有管理体系逐渐暴露出效率低下、资源浪费及响应迟缓等问题。精益化发展的愿景在于通过构建全面精准的信息共享平台,优化供应链流程,实施精细化质量管理,实现生产、加工、仓储、运输等环节的紧密协作与高效运作,从而降低成本、减少损耗并提升整体效益。然而,管理体系精益化在实际落地过程中面临多重挑战。一是技术整合难度高,各环节信息化水平不一,数据标准与接口不统一,阻碍了信息的无缝对接与高效流通。二是流程优化阻力大,既有利益格局与习惯势力阻碍流程再造,需要克服重重阻力推进变革。三是质量标准执行难,农产品供应链长且复杂,确保各环节严格执行统一的质量标准具有极大挑战性。四是人才短缺问题突出,精益化管理需要既懂农业又熟悉信息技术的复合型人才,而当前此类人才供不应求。因此,推动管理体系精益化需采取批判性思维,既要看到其必要性与潜在效益,也要正视实施过程中的重重障碍。通过加强政策引导与资金支持,促进技术整合与标准化建设;通过强化培训与合作,培养跨领域复合型人才;同时,建立激励机制与容错机制,鼓励创新与持续优化,确保精益化管理体系的有效落地与持续优化。

### 4.3 产业模式的低碳化

农产品供应链低碳化是应对气候变化与实现农业可持续发展的核心路径。当前农业碳排放占全球总量超20%<sup>[88]</sup>,传统高耗能模式亟待革新。通过清洁能源应用、资源循环利用和全流程碳足迹管控,构建低耗高效、生态友好的供应链体系,既是响应国际碳关税与绿色消费需求的必然选择,也是提升产业竞争力的战略方向。然而,转型面临多重阻力。一是在技术层面,农业场景下的清洁能源技术(如生物质能、光伏农业)应用成本高、稳定性不足,且低碳设备与传统生产流程适配性差。二是在经济层面,低碳改造需大规模资金投入,中小型农业主体普遍缺乏资金支持,短期收益难以覆盖转型



成本。三是在制度层面,碳排放核算体系不完善、行业低碳认证标准模糊,导致企业减排目标难以量化与追踪。四是在协同层面,上下游环节脱节,低碳技术推广受限于分散化的生产主体与低效的协作机制,难以形成规模化减排效应。为此,需分阶段破解矛盾:短期依托政策补贴与碳交易机制降低转型成本,加强技术研发与试点示范;中期建立统一碳核算标准与监管框架,推动产业链协同减排;长期培育绿色消费市场,以需求驱动供给端深度优化,最终实现生态与经济效益的平衡升级。

**利益冲突声明:** 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

### 参考文献:

- [1] 周云,尹露.现代物流体系支持下农产品供应链智能化发展研究[J].农业经济,2017(9): 120-122.  
ZHOU Y, YIN L. Research on intelligent development of agricultural product supply chain supported by modern logistics system [J]. Agricultural economy, 2017(9): 120-122.
- [2] 梁艺馨,李嘉惊,刘杨.生鲜农产品数字供应链运作模式优化的企业家认知研究[J].农场经济管理,2024(8): 20-24.  
LIANG Y X, LI J C, LIU Y. Research on entrepreneur's cognition of optimizing the operation mode of digital supply chain of fresh agricultural products[J]. Farm economic management, 2024(8): 20-24.
- [3] 邓汝春,刘世明,郭孔快.农产品供应链数字化平台的关键技术及其应用[J].物流技术与应用,2023,28(11): 142-146.  
DENG R C, LIU S M, GUO K K. Key technologies and applications of digital platform for agricultural product supply chain[J]. Logistics & material handling, 2023, 28(11): 142-146.
- [4] MANE A E, TATANE K, CHIHAB Y. Transforming agricultural supply chains: Leveraging blockchain-enabled java smart contracts and IoT integration[J]. ICT Express, 2024(10): 650-672.
- [5] CAO B Y, ZHOU P, CHEN W, et al. Real-time monitoring and early warning of cotton diseases and pests based on agricultural Internet of Things[J]. Procedia computer science, 2024, 243: 253-260.
- [6] WU F Q, GUO S M, HUANG W B, et al. Adaptation of cotton production to climate change by sowing date optimization and precision resource management[J]. Industrial crops and products, 2023, 203: ID 117167.
- [7] TAN B, NIHAN Ç. Agricultural planning of annual plants under demand, maturation, harvest, and yield risk[J]. European journal of operational research, 2012, 220(2): 539-549.
- [8] SHARMA K, SHIVANDU S K. Integrating artificial intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture[J]. Sensors international, 2024, 5: ID 100292.
- [9] FAİÇAL B S, FREITAS H, GOMES P H, et al. An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments[J]. Computers and electronics in agriculture, 2017, 138: 210-223.
- [10] VREUGDENHIL M, WAGNER W, BAUER-MARSCHALLINGER B, et al. Sensitivity of sentinel-1 backscatter to vegetation dynamics: An Austrian case study[J]. Remote sensing, 2018, 10(9): ID 1396.
- [11] REMBOLD F, MERONI M, URBANO F, et al. ASAP: A new global early warning system to detect anomaly hot spots of agricultural production for food security analysis[J]. Agricultural systems, 2019, 168: 247-257.
- [12] VANGIPURAM S L T, MOHANTY S P, KOUIGIANOS E, et al. agroString: Visibility and provenance through a private blockchain platform for agricultural dispense towards consumers[J]. Sensors, 2022, 22(21): ID 8227.
- [13] ZHU L, LI F. Agricultural data sharing and sustainable development of ecosystem based on block chain[J]. Journal of cleaner production, 2021, 315: ID 127869.
- [14] LIU L, YANG F, LIU X Y, et al. A review of the current status and common key technologies for agricultural field robots[J]. Computers and electronics in agriculture, 2024, 227: ID 109630.
- [15] UEHLEKE R, VON PLETTERBERG L, LEYER M, et al. German sugar beet farmers' intention to use autonomous field robots for seeding and weeding[J]. Journal of environmental management, 2024, 370: ID 122472.
- [16] HOU G Y, CHEN H H, NIU R X, et al. Research on multi-layer model attitude recognition and picking strategy of small tomato picking robot[J]. Computers and electronics in agriculture, 2025, 232: ID 110125.
- [17] 张春兰,陈胜慧子,杨爱霞,等.超声波清洗对红枣细菌总数的影响[J].食品工业,2017,38(1): 36-38.  
ZHANG C L, CHEN S, YANG A X, et al. Effect of ultrasonic cleaning on the total bacterial count in jujube[J]. The food industry, 2017, 38(1): 36-38.
- [18] RAHMAN M T, FERDOUS S, JENIN M S, et al. Characterization of tea (*Camellia sinensis*) granules for quality grading using computer vision system[J]. Journal of agriculture and food research, 2021, 6: ID 100210.
- [19] FAQEERZADA M A, KIM Y N, KIM H, et al. Hyperspectral imaging system for pre- and post-harvest defect detection in paprika fruit[J]. Postharvest biology and technology, 2024, 218: ID 113151.
- [20] XU H R, QI B, SUN T, et al. Variable selection in visible and near-infrared spectra: Application to on-line determination of sugar content in pears[J]. Journal of food engineering, 2012, 109(1): 142-147.
- [21] HASAN M, VASKER N, KHAN M S H. Real-time sorting of broiler chicken meat with robotic arm: XAI-enhanced deep learning and LIME framework for freshness detection[J]. Journal of agriculture and food research, 2024, 18: ID 101372.
- [22] THUYET D Q, KOBAYASHI Y, MATSUO M. A robot system equipped with deep convolutional neural network for autonomous grading and sorting of root-trimmed garlics[J]. Computers and electronics in agriculture, 2020, 178: ID 105727.
- [23] SAEDI S I, REZAEI M, KHOSRAVI H. Dual-path lightweight convolutional neural network for automatic sorting of olive fruit based on cultivar and maturity[J]. Postharvest biology and technology, 2024, 216: ID 113054.
- [24] WEI X H, ZHANG M, CHEN K, et al. Intelligent detection and control of quality deterioration of fresh aquatic products in the supply chain: A review[J]. Computers and electronics in agriculture, 2024, 218: ID 108720.
- [25] 刘英娜,边翼博,郭雪霞,等.风干板栗太阳能-热泵联合干燥特性与数学模型研究[J].农业机械学报,2020,51(S1): 509-516.  
LIU Y N, BIAN Y B, GUO X X, et al. Study on drying characteristics and mathematical model of air-dried chestnut combined with solar energy and heat pump[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(S1): 509-516.
- [26] WANG H J, AN D S, RHIM J W, et al. A multi-functional biofilm used as an active insert in modified atmosphere packaging for fresh produce[J]. Packaging technology and science, 2015, 28 (12): 999-1010.
- [27] TRACEY C T, PREDEINA A L, KRIVOSHAPKINA E F, et al. A 3D printing approach to intelligent food packaging[J]. Trends in food science & technology, 2022, 127: 87-98.
- [28] KAPOOR G, LEE Y S, SIKORA R, et al. Drone-based warehouse inventory management of perishables[J]. International journal of production economics, 2024, 278: ID 109437.
- [29] IDRISSE Z K, LACHGAR M, BlockchainHRIMECH H., IoT and AI in logistics and transportation: A systematic review[J]. Transport economics and management, 2024, 2: 275-285.
- [30] GAN M, LI D D, YAO Z, et al. Intelligent decision modeling for

- optimizing railway cold chain service networks under uncertainty [J]. *Information sciences*, 2024, 679: ID 121112.
- [31] ZHENG F, ZHOU X. Sustainable model of agricultural product logistics integration based on intelligent blockchain technology [J]. *Sustainable energy technologies and assessments*, 2023, 57: ID 103258.
- [32] DE MELLO VASCONCELOS O C, DE OLIVEIRA W D, DOS SANTOS COSTA D, et al. Artificial mango with on-board electronic and web-mobile systems to monitor in real time fruit temperature and environmental conditions[J]. *Postharvest biology and technology*, 2024, 217: ID 113080.
- [33] FAN Y W, DONG R Z, LUO Y K, et al. Deep learning models with optimized fluorescence spectroscopy to advance freshness of rainbow trout predicting under nonisothermal storage conditions [J]. *Food chemistry*, 2024, 454: ID 139774.
- [34] 孙小涵, 奚家勤, 彭勇刚, 等. 基于空间映射遗传算法的烟草仓储垛位分配策略研究[J]. *工业控制计算机*, 2024, 37(9): 12-14, 16.  
SUN X H, XI J Q, PENG Y G, et al. Study on warehouse location allocation strategy for tobacco based on spatial mapping genetic algorithm[J]. *Industrial control computer*, 2024, 37(9): 12-14, 16.
- [35] DE SANTIS R B, DE AGUIAR E P, GOLIATT L. Predicting material backorders in inventory management using machine learning[C]// 2017 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI). Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2017: 1-6.
- [36] TANG H T, CHENG X Y, JIANG W G, et al. Research on equipment configuration optimization of AGV unmanned warehouse [J]. *IEEE access*, 2021, 9: 47946-47959.
- [37] PAL S. Advancements in AI-enhanced just-In-time inventory: Elevating demand forecasting accuracy[J]. *International journal for research in applied science and engineering technology*, 2023, 11 (11): 282-289.
- [38] ZHU W B, FU Y, ZHOU Y. 3D dynamic heterogeneous robotic palletization problem[J]. *European journal of operational research*, 2024, 316(2): 584-596.
- [39] SALEHI SHAHRABI M. A quantitative analysis of inaccuracy inventory reducing in multi-period mode: Comparison between RFID and inventory counting[J]. *Computers & industrial engineering*, 2023, 177: ID 109089.
- [40] 费斐. 条形码技术在仓储管理中的应用研究[J]. *物流工程与管理*, 2014, 36(12): 64-66.  
FEI F. Application of barcode technology in warehousing management[J]. *Logistics engineering and management*, 2014, 36 (12): 64-66.
- [41] 王超, 郗红涛. 基于深度学习的货物盘点自动识别方法研究 [J]. *物流科技*, 2024, 47(7): 153-155.  
WANG C, BING H T. Research on automatic recognition method of products stocktaking based on deep learning[J]. *Logistics sci-tech*, 2024, 47(7): 153-155.
- [42] TAJ S, IMRAN A S, KASTRATI Z, et al. IoT-based supply chain management: A systematic literature review[J]. *Internet of Things*, 2023, 24: ID 100982.
- [43] YU J C, WANG M G, LI Z G, et al. Preserving freshness: Innovations for fresh-eating fruit distribution and damage prevention – A review[J]. *Food packaging and shelf life*, 2024, 44: ID 101323.
- [44] SHI Y H, LIN Y, LIM M K, et al. An intelligent green scheduling system for sustainable cold chain logistics[J]. *Expert systems with applications*, 2022, 209: ID 118378.
- [45] KARTHIKEYAN B, PRAVEEN KUMAR G. A comprehensive thermodynamic modeling, feasibility, and optimization study of a renewable energy powered system for sustainable cold chain applications – Cooling, power, heating, and green hydrogen production[J]. *Energy conversion and management*, 2024, 322: ID 119137.
- [46] JEONG J, MOON I. Dynamic pickup and delivery problem for autonomous delivery robots in an airport terminal[J]. *Computers & industrial engineering*, 2024, 196: ID 110476.
- [47] LOISEL J, DURET S, CORNUÉJOLS A, et al. Cold chain break detection and analysis: Can machine learning help [J]. *Trends in food science & technology*, 2021, 112: 391-399.
- [48] MUSTAFA M F M S, NAVARANJAN N, DEMIROVIC A. Food cold chain logistics and management: A review of current development and emerging trends[J]. *Journal of agriculture and food research*, 2024, 18: ID 101343.
- [49] DWIBEDI V, KAUR G, GEORGE N, et al. Research progress in the preservation and packaging of fruits and vegetables: From traditional methods to innovative technologies[J]. *Food packaging and shelf life*, 2024, 46: ID 101385.
- [50] ZHENG G H, LIU L X, DENG L C. Location-routing optimization of cold chain distribution center based on hybrid genetic algorithm - tabu search[C]// CICTP 2014. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2014: 811-820.
- [51] SAIF-EDDINE A S, EL-BEHEIRY M M, EL-KHARBOTLY A K. An improved genetic algorithm for optimizing total supply chain cost in inventory location routing problem[J]. *Ain shams engineering journal*, 2019, 10(1): 63-76.
- [52] HU W C, WU H T, CHO H H, et al. Optimal route planning system for logistics vehicles based on artificial intelligence[J]. *Journal of internet technology*, 2020, 21(3): 757-764.
- [53] JIANG Y P, BIAN B, ZHENG B R, et al. A time space network optimization model for integrated fresh fruit harvest and distribution considering maturity[J]. *Computers & industrial engineering*, 2024, 190: ID 110029.
- [54] ZHENG L. Research on the performance evaluation method for cold chain logistics of agriculture products based on BP neural network mode[J]. *The open cybernetics and systemics journal*, 2015, 9(1): 2168-2172.
- [55] BECKER T, ILLIGEN C, MCKELVEY B, et al. Using an agent-based neural-network computational model to improve product routing in a logistics facility[J]. *International journal of production economics*, 2016, 174: 156-167.
- [56] LIU G K, HU J Y, YANG Y, et al. Vehicle routing problem in cold Chain logistics: A joint distribution model with carbon trading mechanisms[J]. *Resources, conservation and recycling*, 2020, 156: ID 104715.
- [57] 姚佼, 吴秀荣, 李皓, 等. 基于改进K-means算法的物流配送中心选址研究[J]. *物流科技*, 2024, 47(5): 10-13, 19.  
YAO J, WU X R, LI H, et al. Research on logistics distribution center location selection based on improved K-means algorithm [J]. *Logistics sci-tech*, 2024, 47(5): 10-13, 19.
- [58] CHEN L L, HAN S H, YE Z, et al. The optimisation of the location of front distribution centre: A spatio-temporal joint perspective[J]. *International journal of production economics*, 2023, 263: ID 108950.
- [59] 王芳, 滕桂法, 姚竞发. 带时间窗的多目标蔬菜运输配送路径优化算法[J]. *智慧农业(中英文)*, 2021, 3(3): 152-161.  
WANG F, TENG G F, YAO J F. Multi-objective vegetable transportation and distribution path optimization with time windows [J]. *Smart agriculture*, 2021, 3(3): 152-161.
- [60] MENG X C, XIE R H, LIAO J, et al. A cost-effective over-temperature alarm system for cold chain delivery[J]. *Journal of food engineering*, 2024, 368: ID 111914.
- [61] 刘思远, 陈天恩, 陈栋, 等. 时变多车型下的生鲜农产品配送路径优化模型[J]. *智慧农业(中英文)*, 2021, 3(3): 139-151.  
LIU S Y, CHEN T E, CHEN D, et al. Time-varying heterotypic-vehicle cold chain logistics distribution path optimization model [J]. *Smart agriculture*, 2021, 3(3): 139-151.
- [62] MOHAMED-AMINE N, ABDELLATIF M, BELAID B. Artificial intelligence for forecasting sales of agricultural products: A case study of a Moroccan agricultural company[J]. *Journal of open innovation: Technology, market, and complexity*, 2024, 10 (1): ID 100189.
- [63] 庄家煜, 许世卫, 李杨, 等. 基于深度学习的多种农产品供需预测模型[J]. *智慧农业(中英文)*, 2022, 4(2): 174-182.  
ZHUANG J Y, XU S W, LI Y, et al. Supply and demand forecasting model of multi-agricultural products based on deep learning [J]. *Smart agriculture*, 2022, 4(2): 174-182.
- [64] DELLINO G, LAUDADIO T, MARI R, et al. A reliable decision support system for fresh food supply chain management[J]. *Inter-*



- national journal of production research, 2018, 56(4): 1458-1485.
- [65] FEIZABADI J. Machine learning demand forecasting and supply chain performance[J]. International journal of logistics research and applications, 2022, 25(2): 119-142.
- [66] HU C, WU C J, HUANG Z J. Research on precision marketing of E-commerce enterprise based on cluster analysis in the big data environment[J]. Procedia computer science, 2024, 247: 403-411.
- [67] VINOI N, SHANKAR A, AGARWAL R, et al. Revolutionizing retail: The transformative power of service robots on shopping dynamics[J]. Journal of retailing and consumer services, 2025, 82: ID 104085.
- [68] LIBERTY J T, HABANABAKIZE E, ADAMU P I, et al. Advancing food manufacturing: Leveraging robotic solutions for enhanced quality assurance and traceability across global supply networks[J]. Trends in food science & technology, 2024, 153: ID 104705.
- [69] ROSÁRIO A T, DIAS J C. How has data-driven marketing evolved: Challenges and opportunities with emerging technologies[J]. International journal of information management data insights, 2023, 3(2): ID 100203.
- [70] TIAN F. An agri-food supply chain traceability system for China based on RFID & blockchain technology[C]// 2016 13th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM). Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [71] 刘双印, 雷墨馨, 王璐, 等. 区块链关键技术及存在问题研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(3): 66-82.
- [72] LIU S Y, LEI M Y X, WANG L, et al. Survey of blockchain key technologies and existing problems[J]. Computer engineering and applications, 2022, 58(3): 66-82.
- [73] YU Q, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Blockchain-based fresh food quality traceability and dynamic monitoring: Research progress and application perspectives[J]. Computers and electronics in agriculture, 2024, 224: ID 109191.
- [74] YUAN H P, ZHANG L, CAO B B, et al. Optimizing traceability scheme in a fresh product supply chain considering product competition in blockchain era[J]. Expert systems with applications, 2024, 258: ID 125127.
- [75] MISHRA R, SINGH RKR, DAIM T U, et al. Integrated usage of artificial intelligence, blockchain and the Internet of Things in logistics for decarbonization through paradox lens[J]. Transportation research Part E: Logistics and transportation review, 2024, 189: ID 103684.
- [76] DUONG L N K, AL-FADHLI M, JAGTAP S, et al. A review of robotics and autonomous systems in the food industry: From the supply chains perspective[J]. Trends in food science & technology, 2020, 106: 355-364.
- [77] YUAN G, LIU X, QIU X, et al. Human-robot collaborative disassembly in Industry 5.0: A systematic literature review and future research agenda[J]. Journal of manufacturing systems, 2025, 79: 199-216.
- [78] SINGH TOMAR M, PRADHAN R C. Recent developments in solar-powered refrigeration systems and energy storage methods for on-farm preservation of fruits and vegetables[J]. Sustainable energy technologies and assessments, 2024, 72: ID 104032.
- [79] XIAO X Q, FU Y F, YANG Y Y, et al. Sustainable solar powered battery-free wireless sensing for food cold chain management[J]. Sensors international, 2022, 3: ID 100157.
- [80] HALDER P, BABAIE M, SALEK F, et al. Performance, emissions and economic analyses of hydrogen fuel cell vehicles[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2024, 199: ID 114543.
- [81] LIU M, STEVEN TAY N H, BELL S, et al. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 53: 1411-1432.
- [82] YAN Y Z, ZHANG Y Y, FANG Z X, et al. Modified atmosphere packaging and plant extracts synergistically enhance the preservation of meat: A review[J]. Food control, 2024, 164: ID 110622.
- [83] MITTERER-DALTOË M L, BARONI K C, OLDONI T C, et al. Biodegradable packaging with natural colorants added to increase the consumption of eco-friendly packaging[J]. Journal of cleaner production, 2024, 477: ID 143894.
- [84] LI L, DING Y L, XU L, et al. Visualized time-temperature monitoring by triplet-sensitized ratiometric fluorescent nanosensors[J]. Sensors and actuators B: Chemical, 2024, 400: ID 134900.
- [85] LI M, XIE B S, LI Y X, et al. Emerging phase change cold storage technology for fresh products cold chain logistics[J]. Journal of energy storage, 2024, 88: ID 111531.
- [86] SUN S Y, WENG Y X, ZHANG C L. Recent advancements in bio-based plasticizers for polylactic acid (PLA): A review[J]. Polymer testing, 2024, 140: ID 108603.
- [87] XIANG H J, LIAO J H, TANG Y T, et al. Development of cinnamon essential oil-loaded core-shell nano film for the preservation of chilled flesh foods[J]. Food packaging and shelf life, 2024, 45: ID 101310.
- [88] DARWISH M A, ABD-ELAZIEM W, ELSHEIKH A, et al. Advancements in nanomaterials for nanosensors: A comprehensive review[J]. Nanoscale advances, 2024, 6(16): 4015-4046.
- [89] XU X, ZHAO Q, GUO J, et al. Inequality in agricultural greenhouse gas emissions intensity has risen in rural China from 1993 to 2020[J]. Nature food, 2024, 5: 916-928.

## Smart Supply Chains for Agricultural Products: Key Technologies, Research Progress and Future Direction

HAN Jiawei<sup>1,2,3</sup>, YANG Xinting<sup>1,2,3\*</sup>

(1. Research Center of Information Technology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. National Engineering Laboratory for Agri-product Quality Traceability, Beijing 100097, China; 3. Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100097, China)

**Abstract: [Significance]** The smart transformation of agricultural product supply chains is an essential solution to the challenges faced by traditional supply chains, such as information asymmetry, high logistics costs, and difficulties in quality traceability. This transformation also serves as a vital pathway to modernize agriculture and enhance industrial competitiveness. By integrating technologies

such as the Internet of Things (IoT), big data, and artificial intelligence (AI), smart supply chains facilitate precise production and processing, efficient logistics distribution, and transparent quality supervision. As a result, they improve circulation efficiency, ensure product safety, increase farmers' incomes, and promote sustainable agricultural development. Furthermore, in light of global shifts in agricultural trade, this transformation bolsters the international competitiveness of China's agricultural products and propels the agricultural industrial chain toward higher value-added segments. This paper systematically examines the conceptual framework, technological applications, and future trends of smart supply chains, aiming to provide a theoretical foundation for industry practices and insights for policymaking and technological innovation. **[Progress]** In the production phase, IoT and remote sensing technologies enable real-time monitoring of crop growth conditions, including soil moisture, temperature, and pest infestation, facilitating precision irrigation, fertilization, and pest management. Big data analysis, coupled with AI algorithms, helps in predicting crop yields, optimizing resource allocation, and minimizing waste. Additionally, AI-driven smart pest control systems can dynamically adjust pesticide application, reducing chemical usage and environmental impact. The processing stage leverages advanced technologies for efficient sorting, grading, cleaning, and packaging. Computer vision and hyperspectral imaging technologies enhance the sorting efficiency and quality inspection of agricultural products, ensuring only high-quality products proceed to the next stage. Novel cleaning techniques, such as ultrasonic and nanobubble cleaning, effectively remove surface contaminants and reduce microbial loads without compromising product quality. Moreover, AI-integrated systems optimize processing lines, reduce downtime and enhance overall throughput. Warehousing employs IoT sensors to monitor environmental conditions like temperature, humidity, and gas concentrations, ensure optimal storage conditions for diverse agricultural products. AI algorithms predict inventory demand, optimize stock levels to minimize waste and maximize freshness. Robotics and automation in warehouses improve picking, packing, and palletizing efficiency, reduce labor costs and enhance accuracy. The transportation sector focuses on cold chain innovations to maintain product quality during transit. IoT-enabled temperature-controlled containers and AI-driven scheduling systems ensure timely and efficient delivery. Additionally, the integration of blockchain technology provides immutable records of product handling and conditions, enhances transparency and trust. The adoption of new energy vehicles, such as electric and hydrogen-powered trucks, further reduces carbon footprints and operating costs. In the distribution and sales stages, big data analytics optimize delivery routes, reducing transportation time and costs. AI-powered demand forecasting enables precise inventory management, minimizes stockouts and excess inventories. Moreover, AI and machine learning algorithms personalize marketing efforts, improve customer engagement and satisfaction. Blockchain technology ensures product authenticity and traceability, enhances consumer trust. **[Conclusions and Prospects]** As technological advancements and societal demands continue to evolve, the smart transformation of agricultural product supply chains has become increasingly urgent. Future development should prioritize unmanned operations to alleviate labor shortages and enhance product quality and safety. Establishing information-sharing platforms and implementing refined management practices are crucial for optimizing resource allocation, improving operational efficiency, and enhancing international competitiveness. Additionally, aligning with the "dual-carbon" strategy by promoting clean energy adoption, optimizing transportation methods, and advocating for sustainable packaging will drive the supply chain toward greater sustainability. However, the application of emerging technologies in agricultural supply chains faces challenges such as data governance, technical adaptability, and standardization. Addressing these issues requires policy guidance, technological innovation, and cross-disciplinary collaboration. By overcoming these challenges, the comprehensive intelligent upgrade of agricultural product supply chains can be achieved, ultimately contribute to the modernization and sustainable development of the agricultural sector.

**Key words:** agricultural products; smart supply chain; IoT; AI; blockchain; dual-carbon

**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China (2023YFD2001302, 2022YFD2001804); Key Research and Development Program of Ningxia Hui Autonomous Region (2024BEG02031); Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences Research Innovation Platform Construction Project (PT2025-24)

**Biography:** HAN Jiawei, E-mail: hanjw@nrcita.org.cn

**\*Corresponding author:** YANG Xinting, E-mail: yangxt@nrcita.org.cn